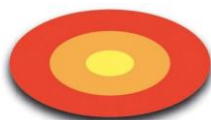




Bilan Carbone®

du parc éolien en mer au large de

Fécamp



BILAN CARBONE®
Utilisateur 2013

Février 2013

DONG
energy



edf
énergies nouvelles

Sommaire

1.	Contexte	3
1.1.	Introduction.....	3
1.2.	Description succincte de la méthode du Bilan Carbone®	3
1.2.1.	Définition du champ d'étude	4
1.2.2.	Collecte des données.....	4
1.2.3.	Exploitation des résultats	4
1.2.4.	Intérêts et limites du Bilan Carbone®	6
2.	Présentation du projet	7
3.	Définition de l'aire d'étude et des moyens utilisés.....	9
3.1.	Définition de l'aire d'étude	9
3.2.	Les moyens utilisés.....	11
4.	Calcul des émissions CO ₂	12
4.1.	Développement du projet	12
4.2.	Fabrication des composants.....	12
4.2.1.	Production des matières premières.....	12
4.2.2.	Production des composants.....	17
4.3.	Construction du parc.....	17
4.3.1.	Transport des composants jusqu'au port.....	17
4.3.2.	Energie pour le levage et la construction du parc.....	18
4.4.	Exploitation et maintenance du parc	19
4.4.1.	Production d'électricité	19
4.4.2.	Opérations de maintenance	19
4.5.	Démantèlement du parc	20
4.5.1.	Energie nécessaire pour la déconstruction des équipements du parc	20
4.5.2.	Transport des différents éléments du port vers les centres de valorisation des matériaux	20
4.5.3.	Valorisation des matériaux.....	21
5.	Bilan.....	23

1. Contexte

1.1. Introduction

Toute activité humaine engendre directement ou indirectement des émissions de gaz à effet de serre (GES). Aussi, toute entreprise industrielle ou tertiaire, toute administration ou association doit légitimement se préoccuper de ses émissions et de la dépendance économique qui en résulte.

Le Bilan Carbone® est une méthode de comptabilisation en ordre de grandeur des émissions de gaz à effet de serre pour parvenir à une bonne évaluation des émissions directes ou induites par l'activité. C'est à la fois un outil et une démarche. La méthode utilisée permet de comptabiliser toutes les émissions, non seulement celles générées directement sur le site mais aussi toutes celles qui concourent tant en amont qu'en aval à la réalisation de l'activité principale.

Au-delà de la comptabilisation, le Bilan Carbone® se situe dans une démarche de management environnemental.

La réalisation d'un Bilan Carbone® s'inscrit dans la dynamique du Grenelle 2 et du « facteur 4 » dont l'objectif pour la France est de diviser par quatre ou plus, d'ici 2050, les émissions de CO₂ par rapport aux émissions réalisées en 1990.

EDF EN France, Dong Energy et wpd Offshore prévoient via leur société du parc éolien en mer de Fécamp d'installer un parc éolien en mer au large des côtes de Fécamp.

Dans le cadre de ce projet, l'objectif est d'évaluer l'impact global en matière d'émissions de gaz à effet de serre de la centrale éolienne en mer à travers toutes les phases de son activité : études préalables, construction, exploitation, maintenance et démantèlement c'est-à-dire depuis les étapes de projet et d'élaboration, jusqu'à la remise du milieu dans son état initial, à l'issue de son exploitation.

Cette analyse permet notamment de préciser les émissions de gaz à effet de serre et de les exprimer en tonne équivalent CO₂ (t eq. CO₂) ainsi qu'en gramme équivalent CO₂ par kWh produit (g eq. CO₂ / kWh).

Les études menées sur d'autres projets éoliens ont une grande variabilité : entre 3 g eq. CO₂ / kWh et 22 g eq. CO₂ / kWh. L'ADEME propose de retenir la valeur de 2 g eq. C / kWh, pour tenir compte d'un facteur de charge moyen français, soit une valeur de 7,3 g eq. CO₂ / kWh, un facteur 44/12 reliant les grammes équivalent Carbone aux grammes équivalent CO₂.

Le bilan carbone du parc éolien en mer au large de Fécamp a été élaboré avec les outils et selon la méthode du Bilan Carbone® (Version V7.1.03). Il a été réalisé par Marie-Cécile Nessi, employée d'EDF EN France, qui a suivi en novembre 2009 la formation de l'ADEME « Bilan Carbone® Module 1 : Acquisition des bases de la Méthode » permettant de réaliser en interne des bilans carbone bénéficiant du label « Bilan Carbone® » (certificat de formation en annexe).

1.2. Description succincte de la méthode du Bilan Carbone®

La réalisation d'un bilan des émissions de GES peut se définir suivant 3 points :

- Définition du champ de l'étude
- Collecte des données
- Exploitation des résultats

1.2.1. Définition du champ d'étude

La méthodologie Bilan Carbone® repose sur un « cycle de vie » complet. Le Bilan Carbone® prend en compte toutes les émissions du projet « du berceau à la tombe » c'est-à-dire :

- les émissions liées à la réalisation des études préalables réalisées lors de la phase de **développement** du projet,
- les émissions liées à la **fabrication** des différents équipements du parc (matières premières, énergie pour la fabrication des composants),
- les émissions liées à la phase de **construction** de la centrale éolienne (fondations, éoliennes, station électrique en mer),
- les émissions liées au **fret** des éléments et matériaux,
- les émissions engendrées lors des phases **d'exploitation et de maintenance** du parc,
- les émissions liées au **démantèlement** de l'installation et à la fin de vie des composants.



Schéma 1 : Périmètre du Bilan Carbone® (source Bilan Carbone®)

1.2.2. Collecte des données

Les données sont rassemblées au sein d'un tableur Excel qui répertorie tous les processus nécessaires à l'activité. Toutes les émissions sont calculées, qu'elles aient lieu directement au niveau du parc éolien en mer ou indirectement chez les clients ou les fournisseurs, dès lors qu'elles correspondent au processus nécessaire à l'activité du parc.

1.2.3. Exploitation des résultats

Les données, représentant chacune une source d'émission de CO₂ ou d'autres gaz à effet de serre sont converties en quantité de carbone émis. Les gaz à effet de serre retenus dans le calcul du bilan carbone sont essentiellement ceux qui font l'objet d'accords internationaux :

- le gaz carbonique ou dioxyde de carbone (CO₂)
- Le méthane (CH₄)
- L'oxyde nitreux (N₂O)
- Les perfluorocarbures (C_nF_{2n+2})
- Les hydrofluorocarbures (C_nH_mF_p)
- L'hexafluorure de soufre (SF₆)

L'impact de chacun des gaz sur le climat est estimé par l'intermédiaire de son pouvoir de réchauffement global (PRG). Plus le PRG est élevé et plus l'effet de serre additionnel engendré par le relâchement d'un kilo de ce gaz est important. Par convention, le PRG compare les gaz à effet de serre au CO₂ et donc le PRG du CO₂ vaut 1. Pour les autres gaz à effet de serre, les différentes éditions du GIEC (Groupement Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) ont donné des valeurs différentes au fil de la dernière décennie.

La méthode Bilan Carbone® est basée sur le PRG à 100 ans figurant dans le rapport 2001 du GIEC (Climate Change 2001, The Scientific Basis).

L'unité de mesure des gaz à effet de serre dans le Bilan Carbone® n'est pas le PRG mais le gramme équivalent CO₂ (souvent noté gCO₂e ou g eq. CO₂) et ses multiples (le kg équivalent CO₂, noté kgCO₂e et la tonne équivalent CO₂, notée tCO₂e). L'équivalent carbone, souvent également utilisé pour mesurer les émissions de gaz à effet de serre, diffère de l'équivalent CO₂, d'un facteur 3,67 (valeur du rapport 44/12, facteur qui correspond au rapport : masse moléculaire du CO₂ / masse atomique du carbone).

Il est à noter que l'équivalent CO₂ qui comptabilise toutes les émissions de gaz à effet de serre du projet sur toute la durée de vie ne doit pas être confondu avec les émissions de CO₂ qui comptabilisent uniquement les émissions de CO₂ sur une période courte.

Il n'est généralement pas possible de procéder systématiquement à des mesures directes de ces émissions de gaz à effet de serre surtout de manière prévisionnelle. Ainsi le transport des nacelles des éoliennes depuis Saint-Nazaire (leur lieu de production) jusqu'au Havre (lieu de stockage provisoire avant l'installation en mer) se fait par cargo ; ce transport génère du CO₂ émis par la génératrice diesel du cargo. Toutefois, en fonction du bateau choisi (puissance du moteur), de la route maritime empruntée, des conditions de mer (consommation de carburant plus importante par gros temps), la consommation du moteur du bateau et donc la quantité de diesel utilisé varie.

La seule manière d'estimer ces émissions est alors de les obtenir par le calcul, à partir de données dites d'activité : nombre d'aller-retour pour transporter les nacelles des éoliennes, distance parcourue, tonnage des éoliennes, etc.

Les chiffres qui permettent de convertir les données observables dans l'entité en émissions de gaz à effet de serre, exprimées en équivalent CO₂, sont appelés des facteurs d'émissions. Le facteur d'émission est une donnée fournie par le tableur Bilan Carbone® en fonction des tonnes transportées et des kilomètres parcourus. L'incertitude liée à ce facteur est également fournie par la méthode Bilan Carbone®.

Le Bilan Carbone® analyse les flux physiques qui concernent l'entité ou le projet (flux de personnes, d'objets, d'énergie, de matières premières...), et fait correspondre les émissions de gaz à effet de serre qu'ils engendrent via les facteurs d'émissions.

1.2.4. Intérêts et limites du Bilan Carbone ®

L'intérêt principal d'un bilan carbone est l'utilisation d'une unité unique. Toutes les mesures sont rapportées en équivalent CO₂ ce qui a pour effet de simplifier l'analyse et de la rendre efficace et compréhensible par tous. Le bilan carbone a toutefois quelques limites :

- L'incertitude liée à la capacité à collecter des données de qualité peut impliquer certaines approximations et la non exhaustivité du bilan carbone®. Des précautions importantes concernant la collecte d'information sont donc à prendre en compte. Toutefois, une imprécision due à la non exhaustivité des données ne fera pas obstacle à la finalité principale de la méthode Bilan Carbone®, qui est de mettre en place des actions de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Pour enclencher puis évaluer l'action, une hiérarchie des émissions et des ordres de grandeur de ces dernières ainsi qu'une évaluation à 20% près suffisent. La réduction des émissions de GES est donc l'objectif final recherché.
- Le Bilan Carbone® est une évaluation qui porte sur un critère environnemental unique : l'impact sur l'effet de serre. D'autres critères, qualitatifs, seraient à prendre en compte (impact sur la biodiversité par exemple) dans une approche de développement durable. Ces éléments seront développés dans l'étude d'impact qui sera réalisée en 2013 par le Maître d'Ouvrage.

2. Présentation du projet

Pour atteindre les objectifs européens de 23% d'énergies renouvelables dans son mix énergétique, la France développe des parcs éoliens en mer au large de ses côtes. La commune de Fécamp située en Seine-Maritime accueillera dans quelques années un parc éolien en mer à 13 km de ses côtes. Le port de base pour l'installation du parc sera le port du Havre et celui pour la maintenance du parc sera le port de Fécamp.

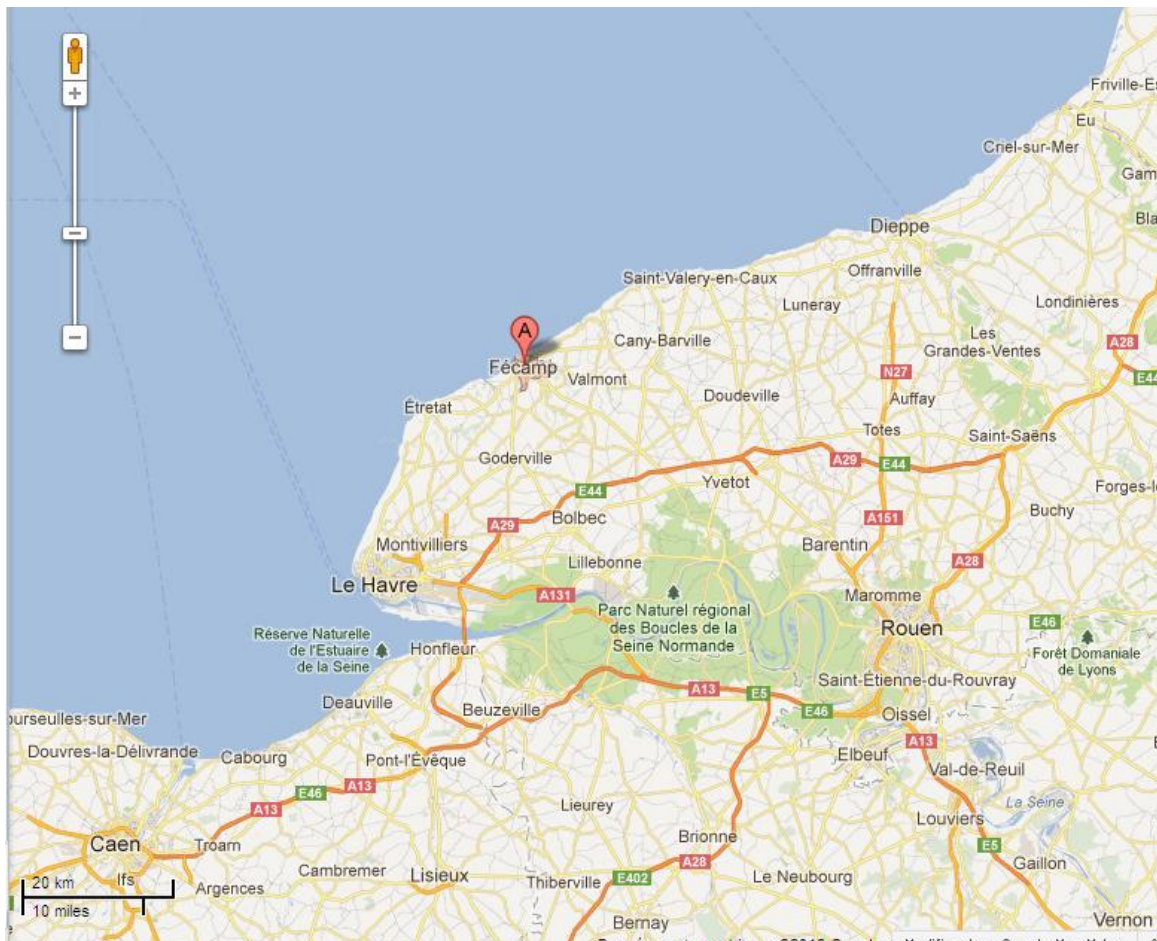


Figure 1 : Implantation du parc éolien en mer de Fécamp

Le Maître d'Ouvrage sélectionné par appel d'offres pour construire et exploiter ce parc éolien propose la mise en place de 83 éoliennes Alstom Haliade de puissance unitaire 6MW pour une capacité totale du parc de 498MW. Ce parc permettra de produire 1800 GWh par an, soit l'équivalent de la consommation électrique de 770 000 habitants, chauffage inclus.

La superficie du parc en mer sera d'un peu moins de 65 km² pour l'implantation des 83 éoliennes. La mise en service du parc est prévue entre 2018 et 2020 et son exploitation devrait durer 25 ans.

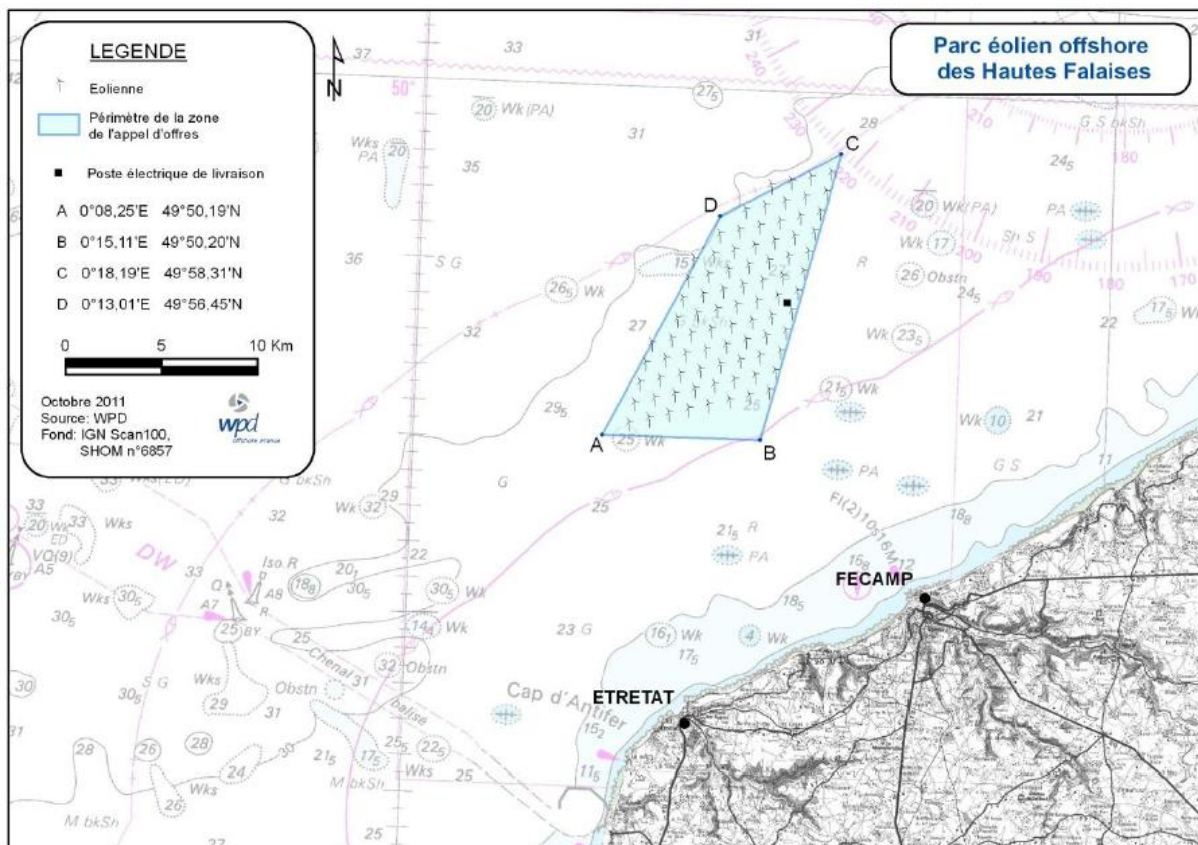


Figure 2 : Plan d'implantation des éoliennes et du poste de livraison

3. Définition de l'aire d'étude et des moyens utilisés

3.1. Définition de l'aire d'étude

Cette étude vise à étudier l'impact du parc éolien en mer installé au large de la commune de Fécamp sur les émissions de gaz à effet de serre. Ces impacts sont étudiés lors des différents moments de la vie du parc. Afin d'être le plus exhaustif possible, les émissions de GES ont été calculées lors des étapes suivantes :

- **Développement** du projet
- **Fabrication** des éoliennes, des fondations, du poste en mer et des câbles.
- **Construction** du parc éolien offshore
- **Exploitation** du parc et de sa **maintenance**
- **Démantèlement** du parc

Les quatre dernières étapes de l'aire d'étude sont détaillées dans les diagrammes ci-dessous :

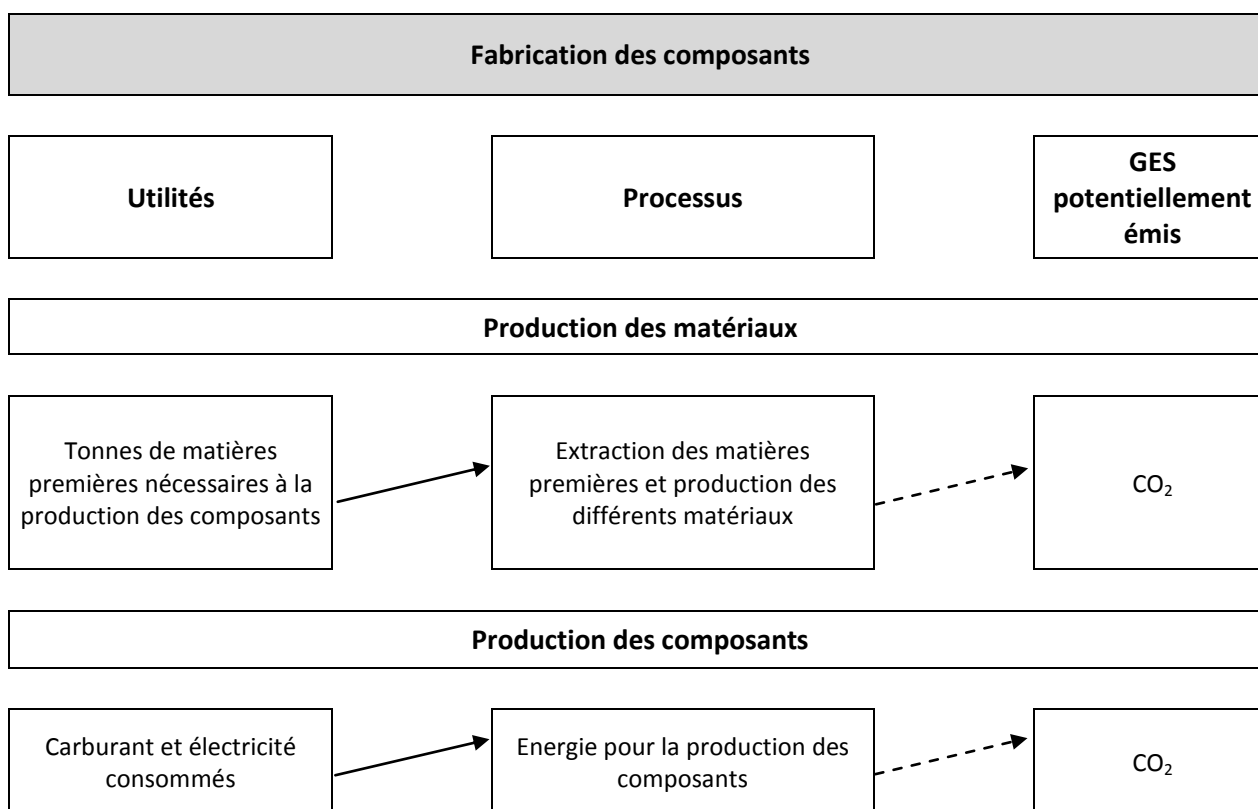


Schéma 2 : Décomposition de l'étape « fabrication des composants »

Le transport des matériaux et produits semi-finis de leur lieu de production vers les usines de fabrication des différents composants n'est pas pris en compte dans le présent Bilan Carbone®, les données sur ces paramètres n'étant pas connues.

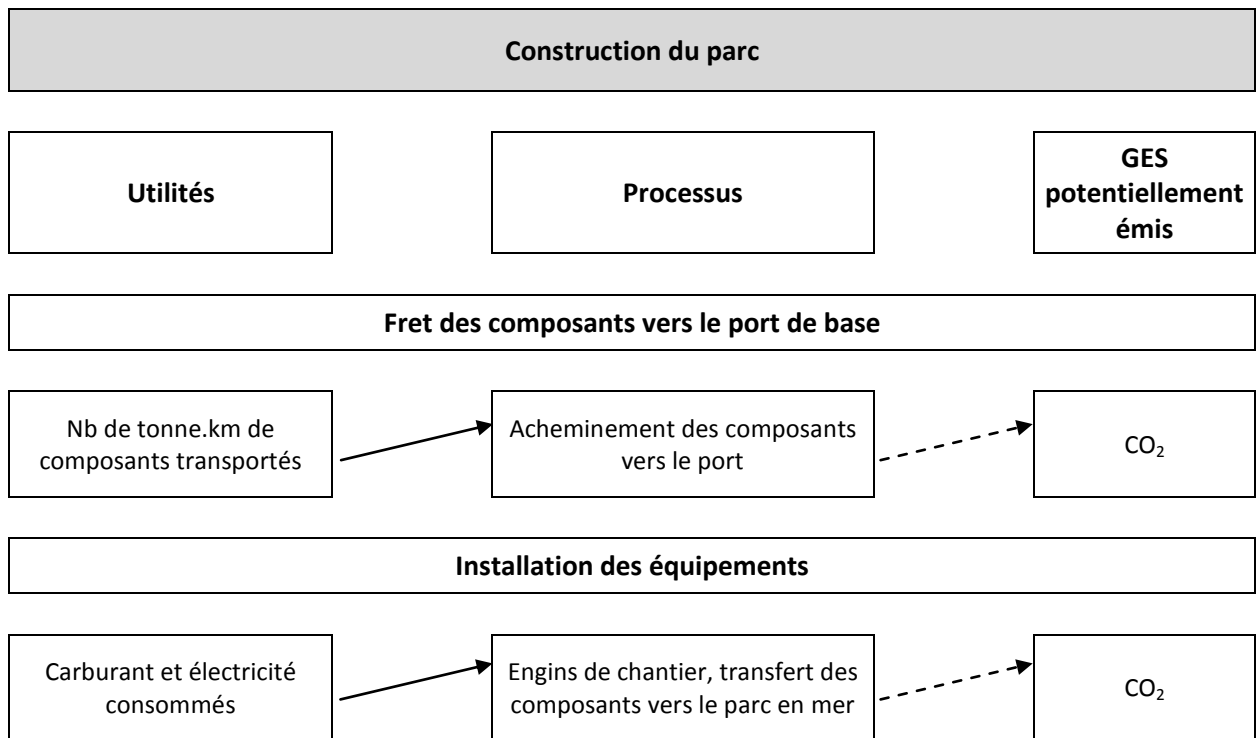


Schéma 3 : Décomposition de l'étape « construction du parc »

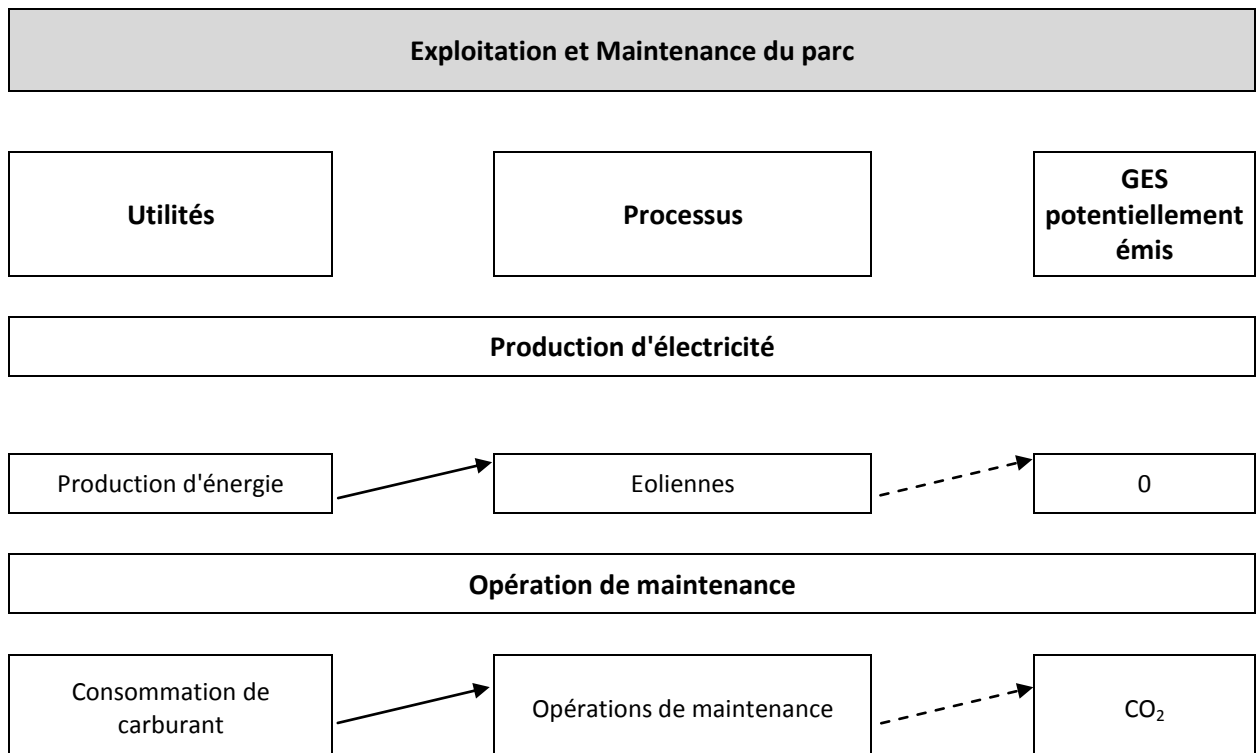


Schéma 4 : Décomposition de l'étape « exploitation et maintenance »

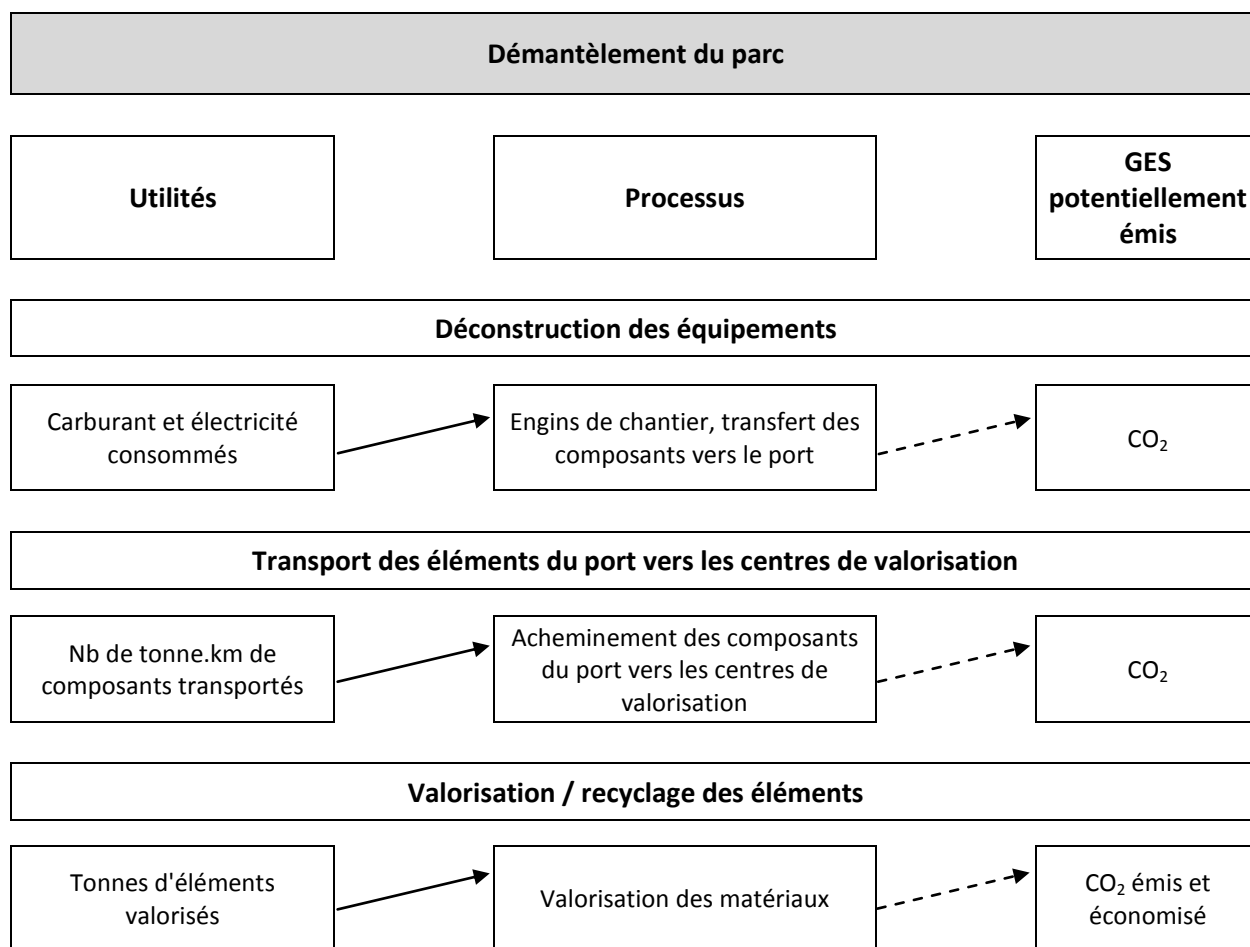


Schéma 5 : Décomposition de l'étape « démantèlement du parc »

3.2. Les moyens utilisés

Les moyens utilisés pour réaliser le Bilan Carbone® du parc de Fécamp sont les suivants :

- Tableur Bilan Carbone® V7.1.03
- Données techniques sur le parc fournies par l'équipe projet du Maître d'Ouvrage
- Données techniques sur les turbines fournies par Alstom

Les facteurs d'émission sont issus de la base ADEME de la méthode Bilan Carbone®. Il s'agit de valeurs moyennes. Les calculs issus de la méthode Bilan Carbone® ont pour but d'identifier les ordres de grandeur des principaux gisements en GES, ils sont systématiquement accompagnés d'une incertitude.

Les résultats du bilan sont exprimés en **tonnes équivalent CO₂**.

4. Calcul des émissions CO₂

4.1. Développement du projet

La phase de développement du projet correspond à l'ensemble des études réalisées préalablement à l'implantation du parc éolien. Elles comprennent à la fois les étapes de réponse à l'appel d'offres et la réalisation d'études complexes comme les études géotechniques ou l'étude d'impact.

Les émissions de gaz à effet de serre propres à cette phase de développement sont difficiles à quantifier. Le logiciel Bilan Carbone® permet d'utiliser pour ce type de services un ratio monétaire afin d'obtenir un ordre de grandeur des émissions de gaz à effet de serre de ces activités qui ne constituent pas le cœur de l'impact du parc éolien en mer.

Pour l'estimation de ces émissions, la phase de développement est assimilée à un service tertiaire fortement matérialisé. Les dépenses associées à l'ensemble de la phase de développement du projet sont de 50 000 000 €.

Ainsi, les émissions associées au développement du projet sont estimées à **5 500 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 2750 tonnes eq. CO₂.

Phase Développement	Emissions en t CO ₂ e	k€ dépensés	kg CO ₂ e par k€	Incertitude en t CO ₂ e
Services fortement matérialisés	5 500	50 000	110	50%
Total	5 500			2 750

Tableau 1 : Calcul des émissions de GES propres à la phase de développement du projet

4.2. Fabrication des composants

De façon générale, les composants sont décomposés en sous-composants qui les constituent. **Les sous-composants dont la masse unitaire était inférieure à 5 tonnes n'ont pas été pris en compte dans le calcul du Bilan Carbone®.**

4.2.1. Production des matières premières

4.2.1.1. Production des matières premières propres aux éoliennes

Les éoliennes considérées sont des éoliennes ALSTOM Haliade 6MW de nouvelle génération, développées pour les conditions de l'éolien en mer. Le parc sera composé de 83 turbines.

Ses principales caractéristiques sont :

- Puissance unitaire : 6MW
- Diamètre du rotor : 150m
- Longueur des pales : 73,5m
- Hauteur de la nacelle : 100m environ
- Technologie « Pure Torque » pour la conception mécanique de la liaison rotor / nacelle de type élastique limitant la transmission d'efforts secondaires parasites à la structure et diminuant la fréquence des opérations de maintenance

- Technologie « Direct Drive » (c'est-à-dire « entraînement direct ») et alternateur à aimants permanents, assurant une meilleure fiabilité par l'absence de multiplicateur et permettant d'obtenir une nacelle plus compacte et légère.



Figure 3 : Vue de l'éolienne Alstom Haliade 6MW

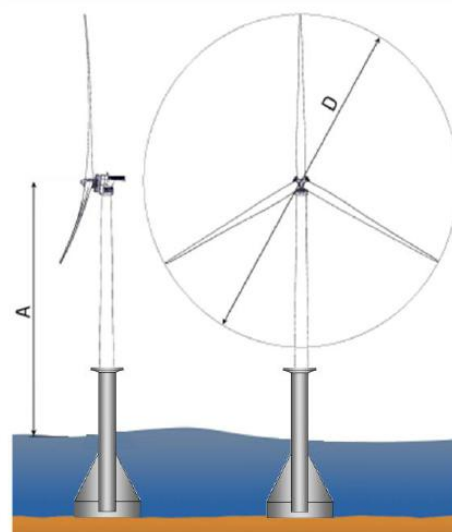


Figure 4 : Vue de côté et de face de l'éolienne Alstom Haliade 6MW

L'aérogénérateur est constitué d'un mat, d'une nacelle et d'un rotor comprenant 3 pales. Les éléments constituant ces composants sont détaillés ci-dessous :

Composant	Sous composant	Matières Premières	Masse (tonne)	nombre pour le parc
Rotor	Pales	fibre de verre	32,5	249
Nacelle	Nacelle dont génératrice	acier	360	83
Mat	3 sections du mat	acier	377	83
	Transformateur	cuivre	10	83
	Autres équipements électroniques	acier	13	83

Tableau 2 : Eléments constitutifs de l'éolienne Alstom Haliade 6MW

Alstom indique utiliser un acier constitué à 80% d'acier secondaire et à 20% d'acier primaire. L'acier primaire est un acier constitué uniquement de minerai de fer neuf, alors qu'un acier secondaire est issu du recyclage de ferraille.

Ces données sont prises en compte dans le calcul du bilan carbone®.

4.2.1.2. Production des matières premières propres aux fondations des éoliennes

Les fondations du parc éolien en mer au large de Fécamp sont de type gravitaire. Il s'agit d'une structure creuse conique en béton armée posée sur une couche de nivellement en cailloutis préalablement préparée et remplie de sable une fois sur place.

Les fondations ont une emprise au sol circulaire de 36m de diamètre à laquelle s'ajoute une extension d'environ 5m de chaque côté pour la couche de nivellement et la largeur de la protection anti affouillement sur les localisations où elle sera nécessaire.

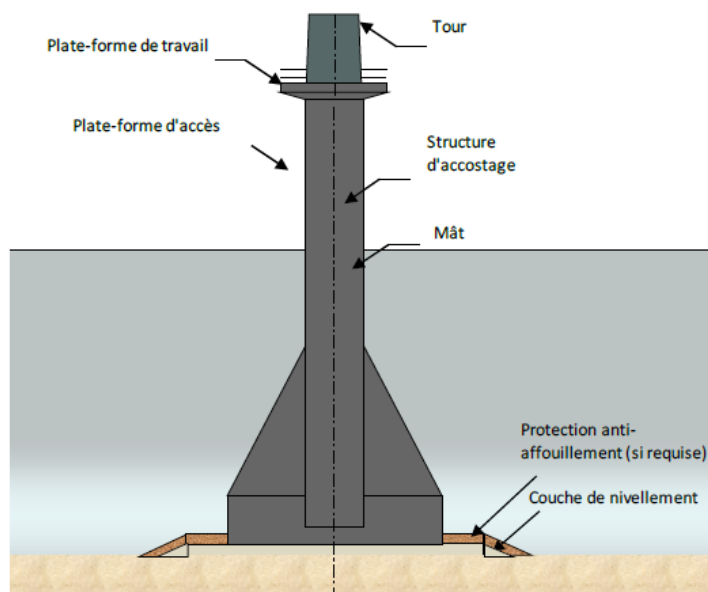


Figure 5 : Schéma d'une fondation à structure embase gravitaire

Elles sont majoritairement constituées de béton, le détail de leur composition est précisé ci-dessous :

Composant	Sous composant	Matières Premières	Poids unitaire (tonne)	Nombre pour le parc
Fondation	Béton	béton	6500	83
	Acier de renforcement	acier	655	83
	Ballast	sable	9760	83
	Structure d'accostage	acier	16	83
	Passerelle	acier	40	83
	J-tubes	acier	10	152

Tableau 3 : Eléments constitutifs d'une fondation de type gravitaire

Le tonnage des différents composants des fondations présenté ci-dessus est basé sur les fondations qui seront mises en place au niveau des zones les plus profondes de la mer. Elles correspondent donc aux fondations contenant le plus de matériaux. Cette approche est donc conservatrice par rapport au cas réel dans lequel la plupart des fondations en place contiendront une quantité moindre de matériaux.

Contrairement aux turbines, la composition acier primaire / acier secondaire de l'acier utilisé pour les fondations n'est pas connue. En France, l'acier produit est à 36,3% composé d'acier secondaire¹.

Le ballast sera constitué de matériaux trouvés dans la mer à proximité du parc, pour le bilan carbone® il sera considéré comme étant du grave non traité.

Ces données sont prises en compte dans le calcul du bilan carbone®.

¹ Données issues du *Steel Statistical Yearbook 2011* de la Worldsteel Association

4.2.1.3. Production des matières premières propres au poste en mer

Le poste électrique de livraison en mer sert à élever la tension de l'électricité produite de 33kV à 225kV pour son injection sur le réseau de transport géré par RTE. Le poste est constitué des éléments suivants :

Composant	Sous composant	Matières Premières	Poids unitaire (tonne)	Nombre pour le parc
Poste de transformation en mer	Structure	acier	810	1
	Transformateur 33/225 kV et cellules 33 et 225kV	acier, cuivre	435	2
	Câbles	cuivre, PEHD, aluminium	17	1
Fondation pour le poste en mer	Jacket	acier	996	1
	Pieux	acier	115	4
	Ciment	pondéreux	33	1

Tableau 4 : Eléments constitutifs du poste électrique de livraison

Les transformateurs et les cellules sont constitués de cuivre et d'acier. La part respective de chacun de ces métaux dans ces composants n'est pas connue. Le type d'acier utilisé pour la structure du poste et sa fondation, primaire ou secondaire, n'est pas connu non plus. Il a donc été considéré que, comme pour les fondations, l'acier utilisé était composé à 36,3% d'acier secondaire, ce qui correspond à la moyenne française. De plus et afin d'être conservateur, le bilan carbone des émissions relatives à ces éléments considèrera le métal le plus impactant, soit le cuivre. De la même façon, les câbles sont considérés comme étant entièrement constitués d'aluminium, matériau ayant l'impact CO₂ le plus important.



Figure 6 : Poste électrique en mer du parc éolien DONG Energy de Walney

4.2.1.4. Production des matières premières propres aux câbles

Deux types de câbles 33kV sont mis en place entre les éoliennes et le poste de transformation, des câbles dont la section fait 240mm² et d'autres dont elle fait 630mm². Les câbles sont constitués d'aluminium, de cuivre et de PEHD. Comme la part relative de ces matériaux n'est pas connue, les câbles sont considérés comme étant entièrement constitués d'aluminium, matériau ayant l'impact CO₂ le plus important. Les quantités de câbles mises en place sur le projet de parc éolien au large de Fécamp sont indiquées ci-dessous :

- Câbles section 240mm² : 1500 tonnes
- Câbles section 630mm² : 2200 tonnes

4.2.1.5. Bilan des émissions des matières premières

Les données recueillies précédemment sont ensuite utilisées dans le tableur de calcul Bilan Carbone® pour les matières premières. Les facteurs d'émission associés à chaque matière première intègrent à la fois l'extraction des matières premières brutes, leur transport vers le lieu de production et la production du matériau à partir du minerai ou de produits recyclés.

En conclusion, les émissions liées à la production des matières premières pour le parc éolien au large de Fécamp sont estimées à **365 500 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 53 000 tonnes eq. CO₂. Le détail par famille de matériau est présenté ci-dessous.

Intrants – Matières premières	Emissions		Incertitudes	
	t CO2e	%	t CO2e	%
Métaux	288 694	79%	38 169	13%
Verre	17 197	5%	3 439	20%
Matériaux de construction	59 660	16%	11 932	20%
Total	365 550	100%	53 541	15%

Tableau 5 : Calcul des émissions de GES propres à la fabrication des matières premières

Le détail par famille est ci-dessous :

Métaux		Emissions t CO2e	Tonnes utilisées	% issu du recyclé	kg CO2e par tonne
Eolienne	Acier	94 495	62 250	80%	1 518
	Cuivre	2 434	830		2 933
Poste en mer	Aluminium	167	17		9 827
	Cuivre	2 552	870		2 933
	Acier	5 509	2 266	36,3%	2 431
Fondation	Acier	147 176	60 533	36,3%	2 431
Câbles	Aluminium	36 360	3700		9 827
Total		288 694			

Verre		Emissions t CO2e	Tonnes utilisées	% issu du recyclé	kg CO2e par tonne
Eolienne	Fibre de verre	17 197	8 092,5		2 125
Total		17 197			

Matériaux de construction - Vrac		Emissions t CO2e	Tonnes utilisées	kg CO2e par tonne
Fondations éoliennes	Béton	47 476	539 500	88
Fondations éoliennes	Grave non traitée	12 151	810 080	15
Fondation poste en mer	Ciment	33	33	990
Total		59 660		

Tableau 6 : Détail du calcul des émissions de GES propres à la fabrication des matières premières

4.2.2. Production des composants

Aucune donnée du constructeur des turbines Alstom n'est pour le moment disponible sur cette étape de fabrication des composants des éoliennes. Une étude réalisée entre 2001 et 2003 dans le cadre du projet européen ECLIPSE (Environmental and ecological life cycle inventories for present and future power systems in Europe), auquel EDF R&D a participé, a permis d'estimer les consommations totales d'énergie faites pour la construction des composants d'une éolienne offshore de puissance unitaire 2,5MW ayant un mat acier tubulaire :

- Consommation électrique : 0,39 TJ / éolienne
- Consommation fioul domestique : 260 kg / éolienne
- Consommation gaz naturel : 6629 m³ / éolienne

Les turbines installées sur le parc éolien en mer au large de Fécamp ont une puissance unitaire de 6MW. Il est donc possible proportionnellement d'obtenir l'énergie nécessaire à la fabrication des 83 turbines Alstom Haliade 150 :

- Consommation électrique : 77,7 TJ, soit 21 580 000 kWh
- Consommation fioul domestique : 51,8 tonnes
- Consommation gaz naturel : 1 320 497 m³, soit 12 795 369 kWh PCI

Ces données permettent donc de déterminer les émissions de gaz à effet de serre propres à la fabrication des composants des turbines qui sont estimées à **4 900 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 360 tonnes eq. CO₂.

Fabrication des composants	Emissions		Incertitudes	
	t CO2e	%	t CO2e	%
Combustibles	3 195	65%	160	5%
Electricité achetée	1 683	35%	202	12%
Total	4 878	100%	362	7%

Tableau 7 : Détail du calcul des émissions de GES propres à la fabrication des composants de l'Haliade 150

4.3. Construction du parc

4.3.1. Transport des composants jusqu'au port

Le port d'installation du projet est le port du Havre. Les composants sont donc livrés au port du Havre avant d'être transportés en mer vers le lieu du parc éolien en mer au large de Fécamp dans le cadre de la construction réelle du parc.

Les pales et les mats sont produits à Cherbourg, la nacelle est fabriquée à Saint-Nazaire. Ces équipements sont ensuite livrés au Havre par la mer.

Les fondations, quant à elles seront fabriquées au Havre. Le béton, l'acier de renforcement et le ballast proviennent du Havre ou de sa proximité immédiate, les distances considérées étant inférieures à 10km, elles ne sont pas prises en compte dans cette étape.

Les émissions associées au transport des équipements entre le port du Havre et le site en mer au large de Fécamp sont intégrées dans l'étape d'installation des équipements et de construction du parc présentée dans la partie 4.3.2.

Fret routier

La structure d'accostage et les J-tubes sont transportés par camions puisque leur poids unitaire est inférieur à 25 tonnes.

Les passerelles des fondations seront transportées sur des faibles distances par des ensembles articulés en raison de leur poids unitaire inférieur à 40 tonnes et les cellules 225kV seront également transportées par des ensembles articulés mais sur des longues distances.

Fret ferroviaire

Les équipements transportés par train sont considérés pour le calcul comme des équipements moyennement dense.

Fret fluvial

Les composants transportés par voie fluviale sont supposés être transportés par des automoteurs de petite capacité (<400 tonnes).

Fret maritime

Les différents équipements seront transportés par cargos entre les différents ports et le port du Havre.

Les émissions de gaz à effet de serre relatives au transport des différents composants vers le parc éolien en mer sont estimées à **4 600 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 2800 tonnes eq. CO₂. Le détail du calcul par type de fret est présenté ci-dessous :

Fret vers port de construction	Emissions		Incertitudes	
	t CO ₂ e	%	t CO ₂ e	%
Fret routier entrant	14	0%	7	47%
Fret ferroviaire entrant	125	3%	88	70%
Fret maritime et fluvial entrant	4 442	97%	2 729	61%
Total	4 581	100%	2 823	62%

Tableau 8 : Calcul des émissions de GES propres au fret des composants vers le port de construction

4.3.2. Energie pour le levage et la construction du parc

L'impact de la construction du parc sur les émissions de gaz à effet de serre est principalement dû aux émissions associées à l'utilisation de navires pour l'installation des différents équipements. Le nombre de jours de navires nécessaires à la construction du parc éolien en mer au large de Fécamp a été évalué par l'équipe projet aux délais suivants :

- L'équivalent de 241 jours de navire consommant 20 tonnes de Marine Gas Oil (MGO) / jour pour l'installation des turbines et du poste en mer, dont 82 jours de standby.
- L'équivalent de 128 jours de navire consommant 25 tonnes de Marine Gas Oil (MGO) / jour pour l'installation des câbles, dont 37 jours de standby.

- L'équivalent de 1000 jours de navire consommant 300 L / heure de Marine Diesel Oil (MDO) pour l'installation des fondations, dont 200 jours de standby
- L'équivalent de 2 ans de 7 petits navires consommant 200L/h/navire de Marine Diesel Oil (MDO) pour la mise en service et les installations diverses, ces navires étant en standby 30% du temps.

Le standby correspond à l'aléa météo pour l'installation des différents équipements. Ainsi, lors de ces journées aléa météo, les navires ne pourront pas quitter le port pour installer les équipements ou bien ils seront immobilisés au niveau du parc en mer. Une consommation de carburant résiduelle est tout de même considérée lors de ces journées standby pour les gros navires : 5 tonnes de MGO.

Ces données permettent d'estimer la consommation de carburant propre à la construction du parc éolien en mer au large de Fécamp :

- 6 050 tonnes de fioul lourd pour les gros navires
- 22 930 m³ de fioul domestique pour les petits navires

L'impact CO₂ de la construction du parc peut donc être estimé à **96 400 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 4 800 tonnes eq. CO₂.

Construction du parc	Emissions		Incertitudes	
	t CO2e	%	t CO2e	%
Fioul domestique, France	74 382	77%	3 719	5%
Fioul lourd, France	22 008	23%	1 100	5%
Total	96 391	100%	4 820	5%

Tableau 9 : Calcul des émissions de GES propres à la construction du parc éolien en mer

4.4. Exploitation et maintenance du parc

4.4.1. Production d'électricité

La seule production d'électricité grâce aux éoliennes n'a pas d'impact sur les émissions de CO₂. En effet, aucun combustible ni aucune matière première n'est utilisée pour produire l'électricité. Seul le vent fait fonctionner les turbines.

En revanche, des opérations de maintenance peuvent avoir lieu au cours de l'exploitation du parc et celles-ci sont à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre. Ces émissions sont étudiées dans le paragraphe suivant.

4.4.2. Opérations de maintenance

Le service logistique d'Alstom estime que la consommation annuelle de carburant liée aux opérations de maintenance d'une turbine est de 7500L. Ainsi l'exploitation des 83 turbines pendant 25 ans entrainera la consommation de 15 560 m³ de carburant.

Les opérations de maintenance du parc entraineront donc des émissions de **50 500 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 2 500 tonnes eq. CO₂. L'impact carbone associé à la consommation de ce carburant est présenté ci-dessous :

Exploitation et maintenance	Emissions		Incertitudes	
	t CO2e	%	t CO2e	%
Combustible	50 484	100%	2 524	5%
Total	50 484	100%	2 524	5%

Tableau 10 : Calcul des émissions de GES propres aux opérations de maintenance du parc éolien en mer

4.5. Démantèlement du parc

Lors du démantèlement du parc, l'ensemble des installations est retiré pour être recyclé et valorisé si possible : les câbles sous marin, l'ensemble des turbines et leur fondation, le poste en mer et sa fondation.

4.5.1. Energie nécessaire pour la déconstruction des équipements du parc

De la même manière que pour la construction, les temps de déconstruction sont considérés identiques pour l'enlèvement des câbles, des turbines, du poste en mer et de leur fondation. Une consommation résiduelle de carburant est considérée pour les journées standby des gros navires.

Ces données permettent d'estimer la consommation de carburant propre à la déconstruction du parc éolien en mer au large de Fécamp :

- 6 050 tonnes de fioul lourd pour les gros navires
- 22 930 m³ de fioul domestique pour les petits navires

L'impact CO₂ de la déconstruction du parc peut donc être estimé à **96 400 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 4 800 tonnes eq. CO₂.

Construction du parc	Emissions		Incertitudes	
	t CO2e	%	t CO2e	%
Fioul domestique, France	74 382	77%	3 719	5%
Fioul lourd, France	22 008	23%	1 100	5%
Total	96 391	100%	4 820	5%

Tableau 11 : Calcul des émissions de GES propres à la déconstruction du parc éolien en mer

4.5.2. Transport des différents éléments du port vers les centres de valorisation des matériaux

L'étape précédente a pris en compte le transfert des différents équipements démantelés vers le port. Les volumes de matériaux à valoriser sont présentés ci-dessous :

Matériau	poids à valoriser (tonnes)	lieu centre valorisation	km route
Acier issu à 80% du recyclage	62 250	régional et régions limitrophes	250
Acier issu à 36,3% du recyclage	62 799	régional et régions limitrophes	250
fibres de verre	8 093	régional	50
cuivre	1 700	régional	50
aluminium	3 717	régional	50
béton	539 500	régional	50
ballast	810 080	réutilisé sur place	

Tableau 12 : Poids des matériaux à valoriser suite au démantèlement du parc éolien en mer

Le ballast contenu dans les fondations sera laissé sur place. Le béton sera concassé et l'acier contenu dedans valorisé, ce dernier est donc pris en compte dans le volume d'acier à valoriser.

Les centres de valorisation seront situés dans la région du Havre. La distance retenue pour le transport des matériaux du port vers les centres de valorisation est donc de 50km. Les matériaux à valoriser seront transportés en camion bennes.

Pour l'acier dont le volume à recycler est important, il sera évacué régionalement mais également sur les régions limitrophes pour que les ferrailleurs puissent absorber le volume. Une distance de 250 km est donc retenue.

L'impact du transport de ces matériaux en fin de vie est de **7 700 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 5 400 tonnes eq. CO₂. Le détail du calcul est indiqué ci-dessous :

Fret vers centres de valorisation des matériaux	Emissions		Incertitudes	
	t CO ₂ e	%	t CO ₂ e	%
Fret routier sortant	7 742	100%	5 420	70%
Total	7 742	100%	5 420	70%

Tableau 13 : Calcul des émissions de GES propres au transport des matériaux à valoriser vers les centres de traitement

4.5.3. Valorisation des matériaux

Le traitement de valorisation des matériaux est consommateur d'énergie. Des émissions de gaz à effet de serre sont donc associées à ce processus.

Le concassage du béton est également consommateur de carburant, mais est indispensable pour permettre la valorisation de l'acier pris dans le béton et la réutilisation du béton pour la voirie par exemple.

Les consommations de carburant sont estimées à 500L de gazole par jour pour une capacité de concassage de 800 m³ par jour soit 1600 tonnes par les entreprises de concassage. Ces consommations de carburant comprennent la consommation du concasseur et celle des pelles associées qui trient les matériaux, les pré-broyent et chargent le concasseur. Ainsi, le concassage des bétons entraînera une consommation de 169 m³ de gazole.

L'impact carbone de cette étape est de **5 100 tonnes eq. CO₂** avec une incertitude de 2300 tonnes eq. CO₂, comme indiqué ci-dessous :

Traitement des matériaux en fin de vie	Emissions		Incertitudes	
	t CO ₂ e	%	t CO ₂ e	%
Métaux	4 305	84%	2 153	50%
Combustible	548	11%	27	5%
Verre	267	5%	134	50%
Total	5 120	100%	2 314	45%

Tableau 14 : Calcul des émissions de GES propres à la valorisation des matériaux

Le détail pour les métaux valorisés est présenté ci-dessous :

Métaux	Tonnes utilisées	% issu du recyclé	kg CO ₂ e émis par tonne	Emissions en t CO ₂ e	kg CO ₂ e évité par tonne	Emissions évitées en t CO ₂ e
Acier	62 250	80%	33	2 054	- 167	- 10 408
Acier	62 799	36,3%	33	2 072	- 533	- 33 442
Aluminium	3 717		33	123	- 3 726	- 13 848
Cuivre	1 700		33	56	0	0
Total				4 305		- 57 699

Tableau 15 : Détail des calculs des émissions de GES propres à la valorisation des matériaux

Par ailleurs, le processus de recyclage des métaux leur permet d'être ensuite réutilisés. Ce phénomène peut donc se traduire par une économie de près de **58 000 tonnes eq. CO₂** comme indiqué ci-dessous.

Economies revendiquées (valorisation)	t CO ₂ e
Emissions évitées métaux	- 57 699
Total	- 57 699

Tableau 16 : Calcul des émissions de GES évitées grâce au recyclage des métaux

5. Bilan

En conclusion, les émissions de gaz à effet de serre du parc éolien en mer au large de Fécamp sont estimées à **637 000 tonnes eq. CO₂** pour l'ensemble de son cycle de vie, avec une incertitude de près de 80 000 tonnes eq. CO₂, sachant qu'une économie de près de **58 000 tonnes eq. CO₂** peut être prise en compte grâce à la valorisation des métaux en fin de vie.

Le détail par étape est indiqué ci-dessous :

Bilan des émissions de gaz à effet de serre	Emissions		Incertitudes	
	t CO2e	Relatives	t CO2e	%
Phase développement	5 500	1%	2 750	50%
Matières premières	365 550	57%	53 540	15%
Fabrication des composants	4 878	1%	362	7%
Construction du parc	96 391	15%	4 820	5%
Exploitation et Maintenance	50 484	8%	2 524	5%
Déconstruction du parc	96 391	15%	4 820	5%
Fret	12 324	2%	8 243	67%
Fin de vie	5 120	1%	2 314	45%
Total	636 637	100%	79 372	12%

Tableau 17 : Bilan des émissions de GES du parc éolien en mer

Les matériaux nécessaires à la construction des équipements représentent donc plus de 50% des émissions de gaz à effet de serre totales du parc tout au long de sa vie.

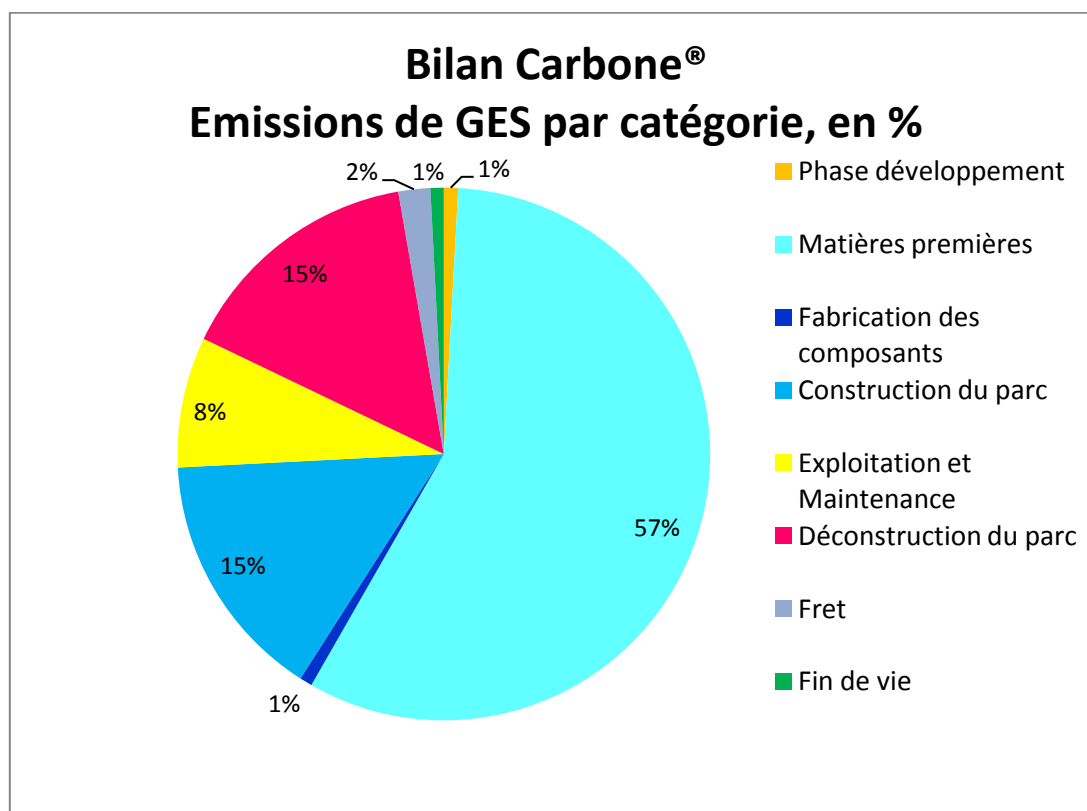


Figure 7 : Répartition des émissions de GES en équivalent CO₂ par catégorie

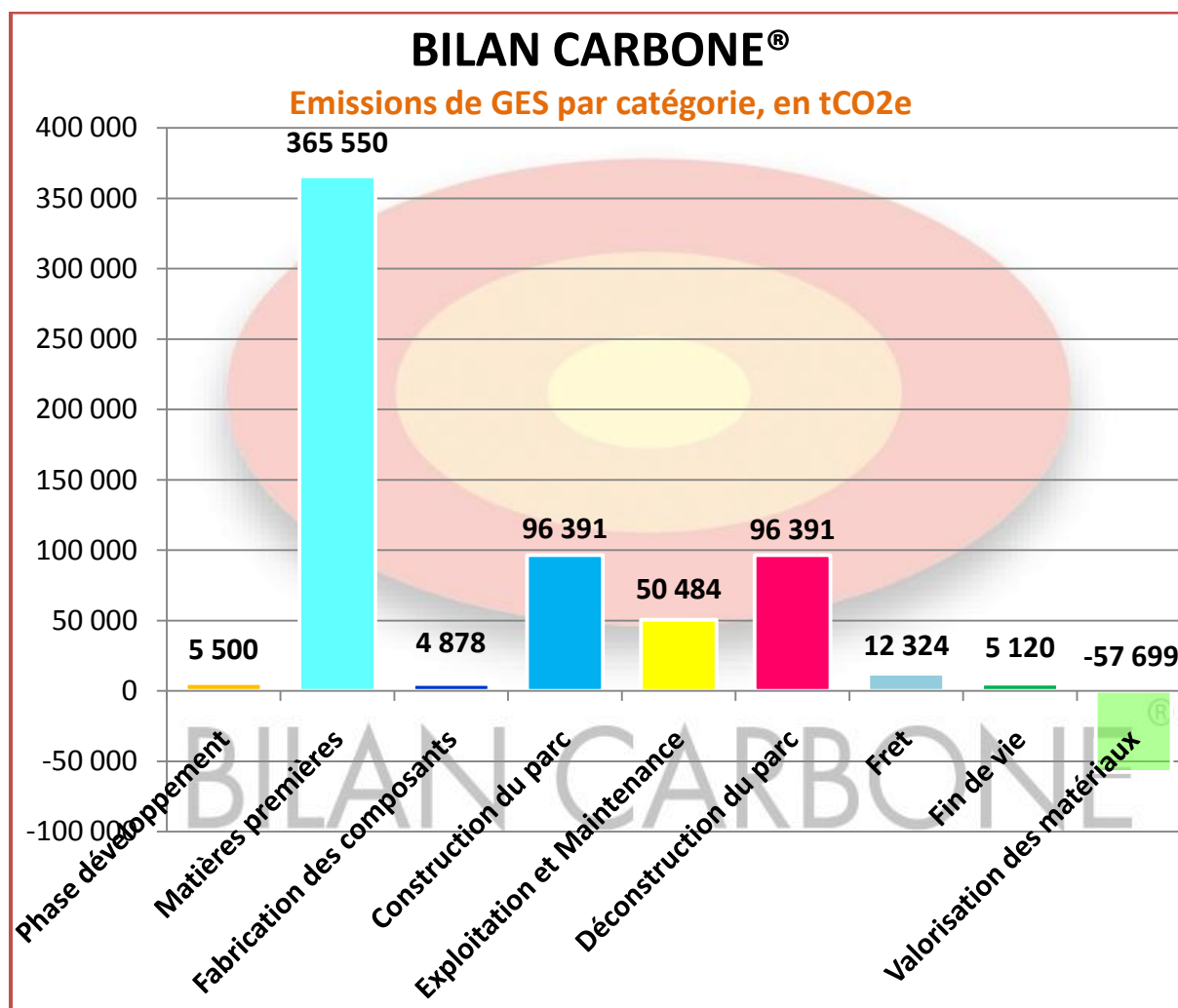


Figure 8 : Emissions de GES en tonnes équivalent CO₂ par catégorie

En conclusion **les émissions de gaz à effet de serre du parc éolien en mer au large de Fécamp sont estimées à 579 000 tonnes eq. CO₂** pour l'ensemble de la durée de vie du parc avec une incertitude de près de 80 000 tonnes eq. CO₂, si l'on intègre la valorisation des métaux en fin de vie équivalant à près de 58 000 tonnes eq. CO₂.

Sans intégrer la valorisation des métaux en fin de vie, les émissions totales sont de 637 000 tonnes eq. CO₂ sur l'ensemble du cycle de vie du parc en mer, à l'exception des étapes de fret des matériaux vers l'usine de fabrication des composants des turbines.

Avec ses 83 turbines, la production d'électricité attendue pour les 25 ans d'exploitation du parc est estimée à **41 450 GWh**.

Les émissions de GES ramenées au kWh produit sont donc de
14 g eq. CO₂ / kWh produit en intégrant la valorisation en fin de vie
15,4 g eq. CO₂ / kWh produit sans intégrer la valorisation en fin de vie
+/- 1,9 g eq. CO₂ / kWh produit

Cette valeur est à comparer à d'autres sources de production d'électricité. L'ADEME et l'association Bilan Carbone® recensent dans la base Carbone de l'ADEME les valeurs moyennes des émissions CO₂ associées à la production d'électricité dans différents pays. Ces valeurs moyennes sont présentées ci-dessous :

Type de production d'électricité	Emissions CO ₂ en g eq. CO ₂ / kWh produit
France - moyenne	72
Union Européenne - moyenne	306
Parc éolien en mer au large de Fécamp	14 (en intégrant la valorisation en fin de vie) 15,4 (sans compter la valorisation en fin de vie)
Parc éolien terrestre – moyenne ADEME	3 à 22
Cycle combiné à gaz	350 à 400
Centrale à charbon	800 à 1000

Tableau 18 : Emissions de GES en tonnes eq. CO₂ des différents types de production d'électricité